

飽和多孔質弾性体における散乱波動場の数値解析手法とその応用

著者	山本 晃司
号	3294
発行年	2004
URL	http://hdl.handle.net/10097/8566

	やまもと こうじ
氏 名	山 本 晃 司
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成 16 年 9 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻
学 位 論 文 題 目	飽和多孔質弾性体における散乱波動場の数値解析手法とその応用
指 導 教 員	東北大学教授 岸野佑次
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 岸野佑次 東北大学教授 岩熊哲夫 東北大学教授 風間基樹 廣瀬壮一 東北大学助教授 寺田賢二郎 (東京工業大学教授)

論文内容要旨

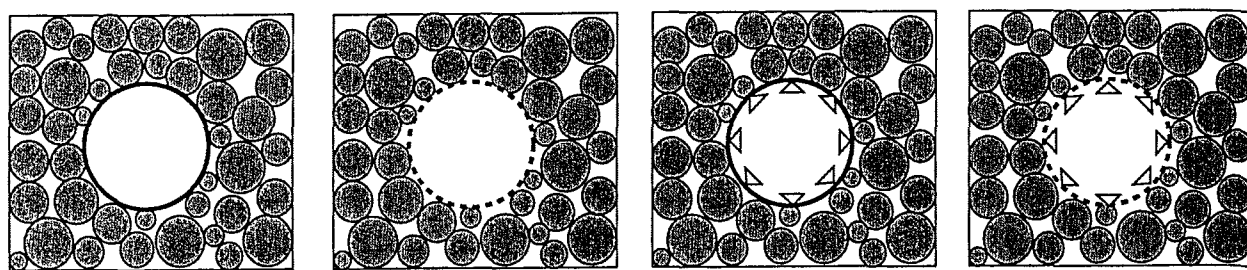
本論文は、従来弾性体を対象に研究されてきた散乱波動場に関する数値解析手法を Biot の多孔質弾性理論に拡張し、流体で飽和した多孔質体における散乱問題に適用したものである。地盤をはじめとする土木工学で扱う材料の多くが多孔質体と見なせることから、本研究は数値解析技術の適用範囲をより現実の材料に近づける試みであると言える。

ここで取り扱うのは、多孔質弾性体媒質内にある散乱体（キャビティまたは物性値が母材と異なるインクルージョン）に弾性波が入射する問題である。解析手法は順問題と逆問題に分けられ、それぞれ境界積分方程式を基礎とした手法で定式化した。順問題では、散乱波動場の性質と材料パラメータの関係を示し、逆問題では散乱体形状の再構成を行う手法を開発した。本論文では、それぞれの理論的基礎と数値解析の定式化、及び数値計算例、及びそれから得られる散乱波動場の性質について述べた。

ここでの関心は散乱波動場の性質を用いて、媒質と散乱体の特性を知ることであり、このことを通じて非破壊検査や弾性波による物理探査から得られる情報に新たな解釈を与えることができると考えられる。その目的において、多孔質弾性体としての特徴が良く現れる問題として、連成の強さを表すパラメータである Biot の有効応力定数 α の変化が散乱波動場に与える影響に着目した。また、CO₂ 地中隔離などにおいて間隙流体の移動や性状の変化を検出・評価する作業を考え、固体としての性質は一様であるが間隙流体の物性値が周辺と異なる領域が存在する場合を計算例として与えた。

第 1 章は序論であり、研究の背景、目的、位置付けについて記述した。地盤の問題における固体・流体連成効果の重要性と既存研究、及び弾性波による探査・モニタリング技術の進展について述べ、Biot の多孔質弾性理論の特徴を概括し、本論文における研究の流れを示した。

第 2 章では、Biot の多孔質弾性理論による波動伝播のモデル、関連する多孔質弾性パラメータ、及び基礎方程式について整理し、多孔質弾性体中の波の性質の特徴を整理した。また、周波数領域の運動方程式の 3 次元基本解を Fourier 変換により求めた。さらに、物理的な意味の明確な境界条件を組み入れるための表面力作用素を導入して、無限多孔質弾性体媒質中に存在する散乱体による散乱波動場の計算を、境界積分方程式を用いて定式化した。ここで定義した表面力作用素を用いることにより、図-1 に示すような四種類の境界条件のいずれかを散乱体表面に与えて散乱波動場の計算ができる。また、散乱波動場の積分表現に遠方近似を導入することにより、多孔質弾性体中の散乱波動場における多孔質弾性体の三つの波（横波 (T-波)、速い



1) 全応力フリー-表面非浸透性 2) 全応力フリー-表面浸透性 3) 変位固定-表面非浸透性 4) 変位固定-表面浸透性

図- 1 多孔質弾性体キャビティ表面の境界条件.

縦波 ($L1$ -波), 及び遅い縦波 ($L2$ -波)) のそれぞれの散乱振幅を求め, 各波の寄与の大きさを示すことができるようになった.

第3章では, 第2章で示した数値解析手法を用いて多孔質弾性体中の散乱体による散乱波動場を求め, 散乱体表面及び近傍の変位及び圧力の分布と, 三つの波それぞれの散乱振幅を計算した. ここでは, 特に多孔質弾性体の物性値と境界条件が散乱波動場中における三つの波の寄与に与える影響に着目し, それぞれの効果をパラメトリックに分析した.

その結果, 連成効果の強さと散乱体表面の境界条件が散乱波動場に大きな影響を与えることを明らかにした. 具体的には, 連成効果が無視できない条件では, 速い縦波の入射によって散乱波中に遅い縦波が現れ, この遅い縦波が散乱体周辺の間隙流体圧力に影響を与えることを示した. 図-2 は, 球形キャビティに速い縦波が入射した場合のキャビティ周辺の間隙流体圧力分布を, 連成が弱い場合, 連成が強く表面が非浸透性の場合, 及び連成が強く表面が浸透性の場合のそれぞれについて表している. この間隙流体圧力分布と図中に付記されたそれぞれの波の波長を比較すると, 散乱波に速い縦波と遅い縦波の成分が両方含まれていることがわかる. それぞれの波の寄与を定量的に表すために, 天頂角 θ の方向へ伝播する散乱波に含まれる速い縦波の散乱振幅 $A_{ur}^{L1:L1}$ 及び遅い縦波の散乱振幅 $A_{ur}^{L2:L1}$ を表したのが図-3 である.

これらの図に示されるように, 流体と固体の連成の強さを示すパラメータである Biot の有効応力定数 α が最小値である間隙率 β から離れ, 最大値の 1 に近づくほど, 散乱波に含まれる遅い波の寄与が大きくなり, そのことが間隙流体圧力の分布を大きく変化させる. また, 散乱体表面が浸透性であるか非浸透性であるかの違いが各波の寄与の大きさと間隙流体圧力分布に強く影響することがわかった.

第4章では, このような散乱波動場に対する連成効果の影響が実際の材料中でどのような効果を生じるのかを知るために, 具体的な地盤の物性値と構造物の問題を考えることとした. ここでは, 地下水面以深に存在する大規模地下空洞に弾性波が入射したときに周辺に励起される散乱波動場, 特に横波の入射によって生じる間隙水圧の発生について, 数値計算を行った. 図-4 は地下空洞周辺に生じた間隙水圧分布と, 散乱波の各波の散乱振幅を表している.

これらの数値解析の結果によって, 間隙水圧の成分を持たない横波の入射によって, 散乱波中に速い縦波と遅い縦波の両方が現れ, 地下空洞周辺に間隙水圧の分布が生じることを示した. 遅い縦波は主に間隙流体中を伝播し, 実際の地盤の条件では散逸性が大きいため遠方まで伝わり難いという性質があるが, この数値解析結果から, 散乱体 (ここでは地下空洞) 周辺の間隙水圧の発生にこの遅い縦波が大きな影響を与えることがわかった.

第5章では, このような順問題としてのアプローチに引き続いて, Born 近似を用いた線形逆散乱解析による逆問題の解法に多孔質弾性モデルを導入して, 多孔質弾性体内において, 固体部分あるいは流体部分の物性値が周囲と異なる領域が散乱体として働く場合の, 散乱体形状の再構成の定式化を行った.

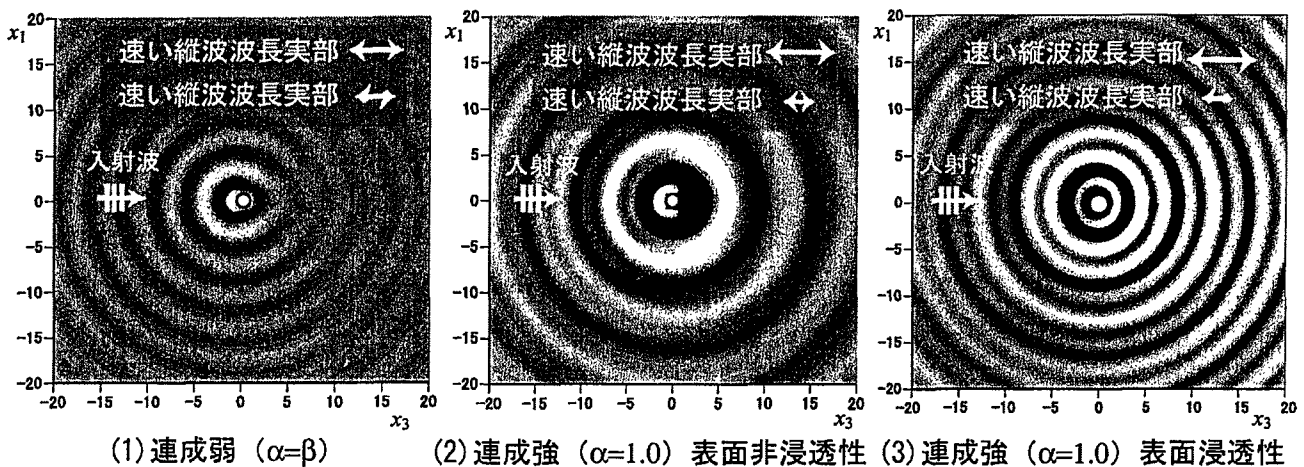


図- 2 速い縦波入射による球形キャビティ周辺の散乱波中の間隙水圧分布.

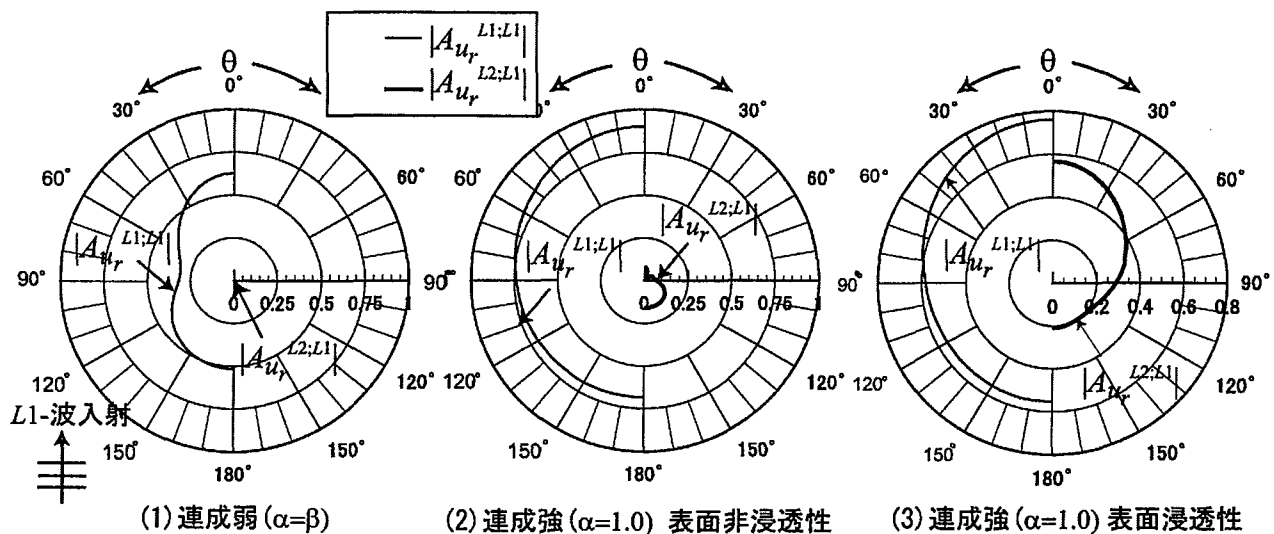


図- 3 球形キャビティによる天頂角 θ の方向に散乱する各波の散乱振幅.

この拡張された線形逆散乱解析法の有効性を確かめるために、固体骨格の性質は周囲と同一であるが間隙流体の体積弾性係数のみが周囲と異なる領域を散乱体として、速い縦波を送受信した場合の形状再構成を、数値解析で得られた模擬的な散乱振幅を用いて行った。図-5はそのような条件下での形状再構成の一例である。この例でも弾性体の問題と同様に明瞭に形状が再構成されている。これらの例題を通じて、多孔質弾性体内において線形逆散乱解析法が適用可能であることを示した。

以上は数値解析による多孔質弾性体における散乱波動場の研究であるが、これらの数値解析手法とモデル化の検証のために、多孔質弾性体の理論が当てはまると考えられるポーラスコンクリートを用いて、弾性波速度測定による多孔質弾性パラメータの同定、及び散乱波動場の計測と数値解析結果との比較を行った。この実験では、弾性体の媒質の内部に多孔質弾性体の散乱体を置いたときに、散乱体が含水状態と乾燥状態の場合の散乱振幅の周波数依存性の違いが、計測と数値解析でよく一致することを確認した。これらの結果は補遺に示した。

第6章は結論であり、この研究で得られた知見を整理し、課題と今後の展望について述べた。

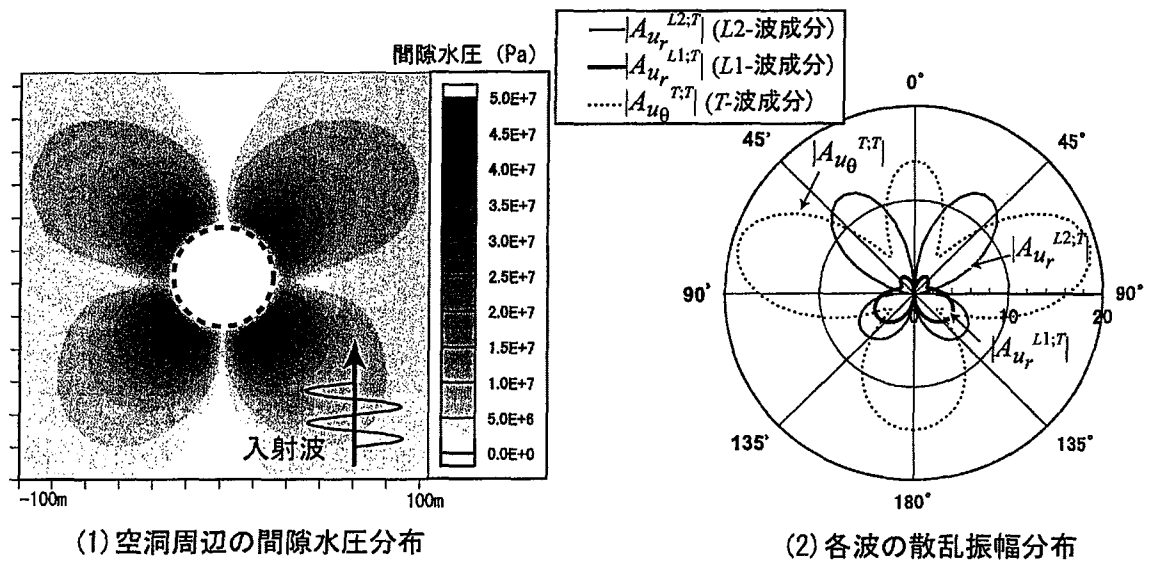


図- 4 球形地下空洞横波への横波入射による間隙水圧分布と各波の散乱振幅分布。

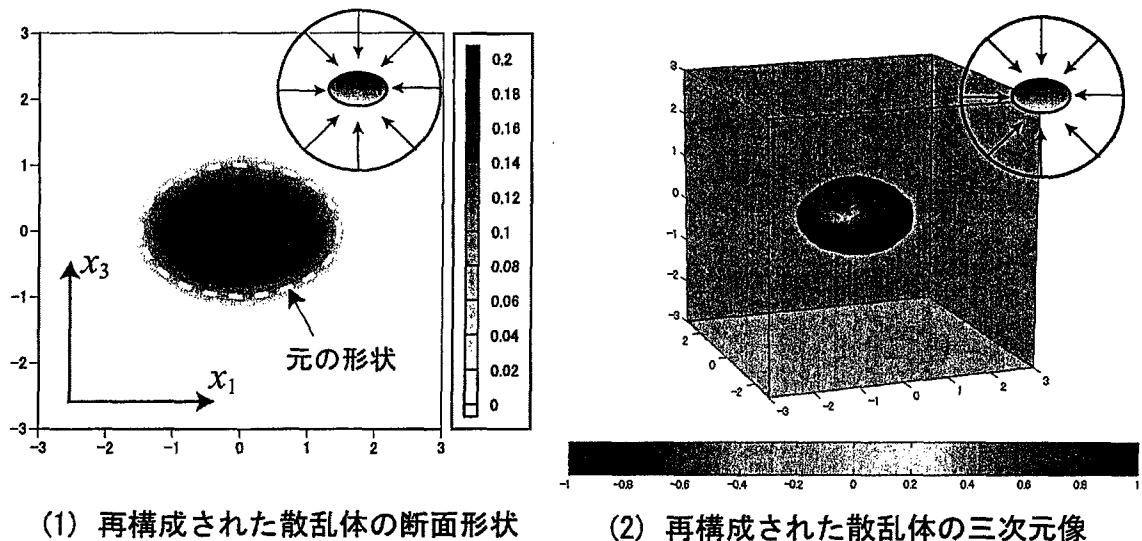


図- 5 間隙流体の弾性定数が母材の 1/10 の扁平楕円体（長軸：短軸比 3:2）の再構成像。

以上の検討を通じて、流体で飽和した材料中における散乱波動場の性質を知るための数値解析手法を開発し、この手法を用いて媒質と散乱体の性質が散乱波動場に与える効果を定量的に求め、固体-流体の連成効果が散乱波動場、特に散乱によって生じる間隙流体圧力に大きな影響を与えることを示した。また具体的な応用として、形状再構成のための逆解析の定式化を行い、数値解析で得られた散乱波を用いてその手法が有効であることを確かめた。

この研究の結果として、Biot の多孔質弾性理論を適用した数値解析手法を開発し、それを用いることで、流体で飽和した多孔質体中での非破壊検査や物理探査から得られる情報に新たな要素が加えられたと考えている。

論文審査結果の要旨

地盤をはじめ、土木工学で扱う材料の多くは多孔質体であり、これらの媒体内に存在する不均質部分を非破壊検査や物理探査により同定するためには、多孔質体における波動伝播の性質を明らかにする必要がある。多孔質体中の波動伝播に関しては、地震学、物理探査、材料科学などの分野で研究が進められたきたが、多孔質体中の散乱源による散乱波動場を解析するための手法は未だ十分に確立されていない。本研究は、従来弾性体を対象に用いられてきた散乱波動場の数値解析手法のBiot多孔質弾性体への拡張を提示するとともに、これを流体で飽和した多孔質体における散乱問題に応用して波動伝播特性を考察し、非破壊検査や物理探査への適用性を検討したものであり、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、Biotの多孔質弾性理論の運動方程式の3次元基本解をFourier変換により求めた後、境界条件を組み入れるための表面力作用素を導入して、無限多孔質弾性体中に不均質部分が散乱体として存在する場合の散乱波動場問題を、境界積分方程式法として定式化を行っている。これにより、多孔質弾性体中の散乱波動場の境界要素法による離散化数値解析を可能としている。とくに、散乱体周辺の散乱波動場における三つの波（横波、速い縦波、遅い縦波）の相対評価を行うための遠方近似が導入されているなど、波動場の解明に有用な手法の提案がなされていると認められる。

第3章では、第2章で示した数値解析手法を用いて散乱波動場の特性をパラメトリックに調べている。とくに、多孔質弾性パラメータと境界条件が散乱波動場におけるそれぞれの波の寄与の大きさに与える影響に着目し、固体変位と流体圧力の連成効果の強さと、散乱体表面の境界における浸透性条件が散乱波動場に大きな影響を与えることを明らかにしている。具体的には、連成効果が無視できない条件では、速い縦波の入射により散乱波中に遅い縦波が現れ、散乱体周辺の間隙流体圧力に影響を与えることなど、新しい知見が得られている。

第4章では、このような散乱波動場の連成効果が実際の媒体においてどのような波動伝播特性として現れるかを知るために、地下水面以下に存在する大規模地下空洞に弾性波が入射したときに周辺に励起される散乱波動場、とくに横波の入射によって生じる間隙水圧の発生について、数値解析により検討を行っている。遅い縦波は主に間隙流体中を伝播し、実際の条件では散逸性が大きいと遠方まで伝わり難いという性質があるが、数値計算結果より地下空洞周辺の間隙水圧の発生に遅い縦波が大きな影響を与えるという新しい知見が得られている。

第5章では、従来弾性体について用いられてきたBorn近似による線形逆散乱解析手法の多孔質弾性体への拡張について示し、この数値解析手法の散乱体形状の同定問題への適用性が検討されている。具体的には、流体の物性値が周囲と異なる散乱体領域を含む多孔質弾性体の例について、あらかじめ順問題として解析した散乱波動場の結果に基づいて逆解析を行った結果、元の散乱体形状が明瞭に再構成されている。このように、ここで提案されている拡張線形逆散乱解析手法は、多孔質媒体中の散乱体形状の再構成手法として有用な手法であると認められる。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、散乱波動場の問題に対して、Biotの多孔質弾性媒体としての3次元数値解析手法を提示し、この手法に基づく非破壊検査や物理探査が、飽和した多孔質体中の不均質部分の同定を可能にすることを示したものであり、散乱波動伝播の研究とその工学的応用の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。